

# Modélisation des propriétés mécaniques du bois à partir de la mesure de la pente de fil

**Y.FAYDI<sup>a</sup>, J.VIGUIER<sup>b</sup>, G.POT<sup>a</sup>, V. DAVAL<sup>a</sup>, R.COLLET<sup>a</sup>, L.BLERON<sup>b</sup>,  
L.BRANCHERIAU<sup>c</sup>**

a. Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés (LaBoMaP), Arts et Métiers ParisTech, F-71250 CLUNY (FRANCE). Younes.faydi@ensam.eu, guillaume.pot@ensam.eu, vincent.daval@ensam.eu, robert.collet@ensam.eu

b. Université de Lorraine, ENSTIB/LERMAB, 27 rue Philippe SEGUIN, BP1041, F-88051 Epinal Cedex 9, France. joffrey.viguiier@univ-lorraine.fr, laurent.bleron@univ-lorraine.fr

c. CIRAD - Département PERSYST, UPR 114 "Biomasse, bois, énergie, bio-produits", TAB114/1673 Rue Jean François Breton 34398 Montpellier Cedex 5, loic.brancheriau@cirad.fr

## Résumé

*La prédiction des propriétés mécaniques du bois est indispensable pour ses applications en construction. Ainsi, les normes européennes imposent de réaliser un classement mécanique. C'est dans cette perspective que plusieurs fabricants de machines de classement attachent une grande importance aux singularités qui influent directement sur les performances mécaniques du bois. Cette étude s'intéresse particulièrement à l'orientation des fibres dite « pente de fil » à travers un modèle permettant d'estimer les principaux paramètres mécaniques caractérisant les sciages. Ces derniers sont comparés à ceux obtenus à partir d'un modèle utilisant une mesure de masse volumique locale obtenue grâce à un scanner à rayons X.*

## Abstract

*Mechanical properties of wood must be predicted before using that material in construction application. Thus, European standards impose mechanical grading. In this perspective, manufacturers of grading machines focus their attention on wood defects which have a major influence on its mechanical properties. This paper studies particularly fiber orientation called "grain angle" through a model which allows to calculate the essential mechanic parameters characterizing wooden boards. These parameters are compared with those ones obtained from local density obtained by X-Ray scanning.*

**Mots clés : Pente de fil, Modélisation mécanique, Nœuds, Classement mécanique du bois**

## 1. Introduction

Le bois est un matériau naturel présentant plusieurs caractéristiques avantageuses comme la faible consommation d'énergie nécessaire à sa mise en œuvre, et ses caractères renouvelable et recyclable. Il permet aussi de stocker du carbone et ainsi de diminuer les rejets de CO<sub>2</sub>. Cependant, un verrou technologique qui limite sa valorisation réside dans sa variabilité mécanique. En effet, contrairement aux matériaux de construction les plus courants, le bois est un matériau vivant dont les propriétés sont régies par la nature. Ainsi il peut exister une variabilité des propriétés entre deux arbres d'une même essence voire même au sein d'un même arbre. L'origine de ce phénomène tient à la présence de plusieurs types de singularités comme les nœuds, les fentes, le bois de réaction ou bien la pente de fil. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de déterminer au préalable les performances mécaniques de chaque planche avant d'utiliser le bois dans une application constructive, ce qui est appelé classement mécanique dans les normes européennes. Les règles pour procéder à ce classement à l'aide de machine sont définies dans les normes EN 338[1] et EN 14081[2].

La plupart du temps le classement pour la résistance est encore réalisé visuellement par les opérateurs qui classent le bois selon les singularités observées en suivant la norme NF B52-001-1 [3]. Cependant, cette méthode sous-estime les caractéristiques mécaniques des bois et limite ainsi leur emploi.

La norme EN 338 relative au classement mécanique met en avant trois propriétés fondamentales : la masse volumique, le module de Young et la résistance à la rupture. Ces dernières permettent ensuite de dimensionner des structures selon les règles de l'Eurocode 5. Le classement par machine a pour objet de mesurer ou prédire ces propriétés à l'aide de moyens non-destructifs. Plusieurs types de machines sont commercialisés. On peut citer par exemple les scanners par rayons X qui mesurent ponctuellement la masse volumique et permettent la détection des nœuds[4], la caractérisation vibratoire qui mesure le module de Young à partir des fréquences propres, ou bien encore les moyens de mesure par vision pour évaluer le type, la taille et la position des singularités présentes sur la planche [5, 6]. Une combinaison des machines est souvent utilisée afin d'améliorer leur rendement en associant par exemple les rayons X pour la masse volumique et des lasers pour la pente de fil [4,7], dont on expliquera ultérieurement l'importance. La combinaison de certaines machines présente cependant un coût que les entreprises de l'industrie du bois ne peuvent pas toujours supporter.

Pour toutes les machines, la masse volumique et le module de Young sont des paramètres évalués avec une précision satisfaisante, mais la mesure de la résistance à la rupture reste inaccessible de manière non-destructive. La résistance à la rupture est souvent calculée à partir des singularités présentes dans le bois et/ou à partir de la corrélation qui existe pour le bois entre la masse volumique ou le module de Young et la résistance. Les machines les plus évoluées traitent les mesures réalisées à l'aide d'un modèle mécanique permettant de prédire la résistance [4, 7].

L'objectif de cette étude est de se focaliser sur l'utilisation de l'information « pente de fil » dans un modèle mécanique permettant le calcul de la résistance à la rupture et du module de Young. On s'affranchira ainsi de la mesure des masses volumiques locales et du « KnotDepth Ratio » (KDR) qui suscite l'utilisation des rayons X, qui est une technique relativement coûteuse. Les résultats de l'analyse vibratoire pourront être intégrés au modèle. L'intérêt d'une mesure de la pente de fil seule ou avec le scanner aux rayons X sera finalement discutée.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1 Echantillonnage

Nous nous sommes intéressés particulièrement au douglas, bois résineux très présent en France et utilisé en construction. Afin d'obtenir des résultats validant la méthode employée, un lot de 805 planches a été testé dans le cadre du projet ANR CLAMEB issu des scieries partenaires du projet. Il comporte différentes sections (40x100 mm<sup>2</sup>, 50x150 mm<sup>2</sup>, 65x200 mm<sup>2</sup>). Cet échantillonnage permet ainsi une certaine représentabilité de l'essence étudiée.

### 2.2 Appareillage

#### *Mesure de la pente de fil*

L'orientation des fibres dans le plan (appelée « pente de fil ») est mesurée à l'aide du système CombiScan+ de la société Luxscan. Ce système est composé de lasers points dont la lumière est diffusée de façon anisotropique au sein du matériau créant ainsi une forme elliptique parallèle à l'axe de la fibre. Ce phénomène est appelé effet trachéide [8]. Par traitement d'image, on obtient en sortie le grand axe de l'ellipse « a », le petit axe « b » et l'angle  $\varphi$  des fibres par rapport à la planche (figure 1). A noter que le cas particulier où  $a = b$  correspond à la présence d'un nœud (fibres plongeantes, donc pas de diffusion en forme d'ellipse). Dans le modèle, on associera à ces mesures le module élastique et la résistance à la rupture obtenue pour un angle de 90°. Le traitement d'image est opéré sur la face supérieure et inférieure de chaque planche, sur toute la longueur de celle-ci.

Remarquons que le CombiScan+ dispose en plus d'un scanner aux rayons X afin de calculer la proportion de nœud dans l'épaisseur, appelée KDR [4].

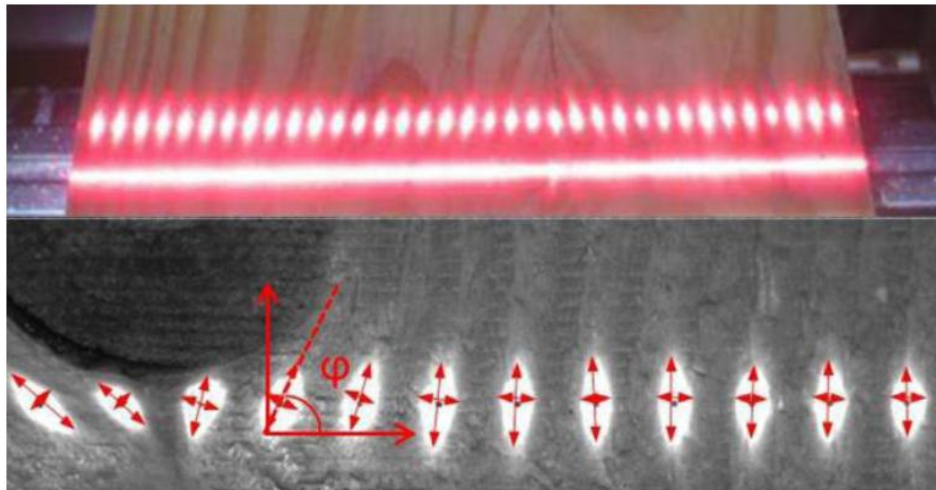


Figure 1: Illustration de l'effet trachéide [4]

#### *Mesure vibratoire*

Une méthode vibratoire [9] est employée pour déterminer le module de Young à partir de l'analyse du spectre de fréquence sous une sollicitation de traction/compression. On impose une sollicitation sous

forme de percussion dans le sens longitudinal de l'éprouvette à l'une de ses extrémités. L'échantillon repose sur deux supports élastiques. L'onde de vibration est transmise à l'autre extrémité et relevée à l'aide d'un microphone qui enregistre le signal (figure 2).

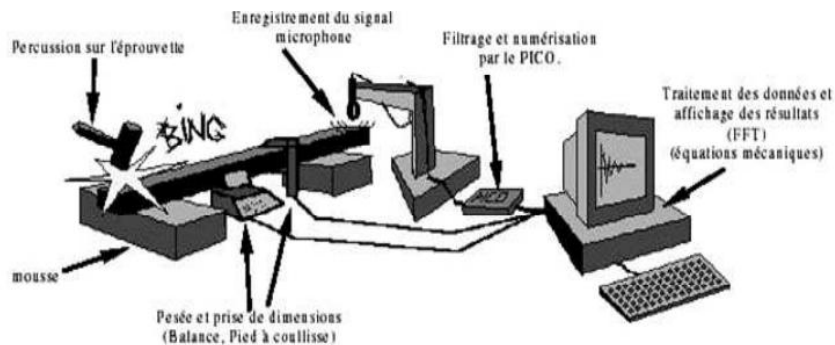


Figure 2 : Dispositif de la méthode vibratoire BING

### Mesure destructive

Après réalisation des mesures non-destructives, tous les sciages ont été testés en flexion quatre points en respectant la norme EN 408 [10]. Le module élastique global et la résistance à la rupture sont mesurés pour chaque pièce de bois. Ces mesures permettent de tester le modèle mécanique décrit ci-dessous. Elles ont été effectuées au sein du FCBA.

## 2.3 Modélisation mécanique

Le principe du modèle est basé sur la discrétisation de chaque planche en plusieurs éléments dont les dimensions sont à celles du pixel relatif à l'image extraite du CombiScan+ (10x4 mm<sup>2</sup>). Des propriétés mécaniques dites « élémentaires » sont allouées à chaque élément en fonction de la position dans la planche, puis des propriétés à l'échelle de la planche, dites « globales » en sont déduites.

### Calcul du module élastique élémentaire

Le module élastique est calculé pour chaque élément à partir de l'orientation des fibres grâce à l'équation de Hankinson. Cette dernière fait intervenir trois paramètres à savoir :

$E_0$  : Module élastique pour des fibres parallèle à l'axe longitudinal ( $E_0 = 15600$  MPa) [11]

$E_{90}$  : Module élastique pour des fibres perpendiculaire à l'axe longitudinal ( $E_{90} = 1370$  MPa) [11]

$n$  : Facteur dépendant du type de sollicitation et optimisé dans notre modèle ( $n = 1.75$ )

$$\frac{E_\varphi}{E_0} = \frac{\frac{E_{90}}{E_0}}{\sin(\varphi)^n + \left(\frac{E_{90}}{E_0}\right) \cos(\varphi)^n} \quad (2)$$

Avec  $\frac{E_\varphi(x,y)}{E_0}$  le rapport de réduction du module pour chaque élément de position  $(x,y)$  dans la planche, et  $\varphi$  l'angle des fibres pour chaque élément ( $\varphi$  dépend donc de  $(x,y)$ ). L'équation (2) est la forme réduite d'Hankinson qui est normée. Afin d'obtenir le module élastique de chaque élément on pourra considérer le module global de la planche par une approche vibratoire pondérée par la formule de Hankinson, selon la formule suivante :

$$E_e(x, y) = E_{vib,g} \frac{E_\varphi(x, y)}{E_0} \quad (3)$$

Avec :  $E_e(x, y)$  : Module élastique élémentaire

$E_{vib,g}$  : Module élastique global issu de la mesure vibratoire

### Calcul du module élastique global

Le principe des travaux virtuels est appliqué pour calculer, dans un premier temps, la flèche au milieu de la planche :

$$Flèche = \sum_{i=1}^N \frac{M_{f_i} \cdot M_{v_i} \cdot \Delta l_i}{(EI)_{eff_i}} \quad (4)$$

Avec: N: Nombre de sections droites (pixels dans le sens longitudinal)

$M_{f_i}$  : Moment de flexion sur une section droite

$M_{v_i}$  : Moment de flexion pour un effort unitaire sur une section droite

$\Delta l_i$  : Longueur de chaque élément

$(EI)_{eff_i}$  : Rigidité efficace de flexion sur une section droite (calculée à partir de  $E_e(x, y)$ )

On calcule ensuite le module élastique global (MOE), selon l'équation suivante :

$$MOE = \frac{23.F.l^3}{648.I.Flèche} \quad (5)$$

### Calcul de la résistance à la rupture

La résistance à la rupture de chaque élément est calculée à partir de l'équation d'Hankinson et du module élastique global :

$$R_e(x, y) = K.MOE. \frac{\frac{R_{90}}{R_0}}{\sin(\varphi)^n + (\frac{R_{90}}{R_0}) \cos(\varphi)^n} \quad (6)$$

Avec :  $R_{90}$  : Résistance à la rupture pour des fibres perpendiculaire à l'axe longitudinal ( $R_{90} = 3$  MPa)

$R_0$  : Résistance à la rupture pour des fibres parallèles à l'axe longitudinal ( $R_0 = 50$  MPa)

n : Facteur dépendant du type de sollicitation et optimisé dans notre modèle ( $n = 1.9$ )

K : Facteur optimisé de linéarité entre la résistance locale de rupture et le MOE global

La figure 3 illustre la variation des résistances à la rupture élémentaires au sein d'une même planche.

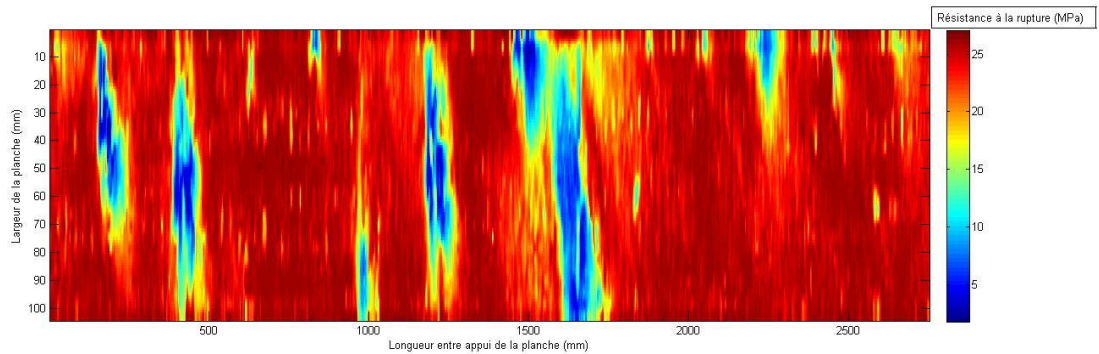


Figure 3 : Exemple de répartition des résistances de rupture dans une planche de bois

A partir de ces contraintes, on remonte aux moments de flexion limites de chaque élément puis on établit une matrice d'efforts limites. On détermine ensuite la région de rupture qui possède en moyenne les plus faibles efforts. Cette phase nous donne accès à la résistance de rupture (MOR).

$$MOR = \frac{M_{f\lim}}{I/h/2} \quad (6)$$

Avec  $M_{f\lim}$  : Moment de flexion correspondant à l'effort moyen de la région de rupture

h: Largeur de la planche

I: Moment d'inertie de la planche

### 3. Résultats et discussions

L'ensemble des résultats est résumé dans le tableau 1. Il contient le coefficient de détermination  $R^2$  entre les mesures destructives provenant de la campagne expérimentale et celles résultant du modèle, ce qui permet de comparer les méthodes entre elles.

Technique de mesure	$R^2$ du MOE	$R^2$ du MOR	Commentaire
Méthode vibratoire	0.80	0.41	Mesure globale des paramètres
Pente de fil + vibratoire	0.82	0.58	
Rayons X + vibratoire	0.82	0.48	Prise en compte du KDR
Rayons X + pente de fil	0.75	0.58	Prise en compte du KDR
Rayons X + Pente de fil + vibratoire	0.82	0.62	Prise en compte du KDR

Tableau 1 : Coefficients de détermination entre le modèle et les essais destructifs

L'analyse vibratoire permet une bonne estimation du module élastique avec un  $R^2$  de 0.80. Généralement, cette méthode est reconnue pour son efficacité particulièrement sur du bois sain [10]. Ici, elle n'est pas parfaite en raison de la présence de diverses singularités. Le couplage du vibratoire avec un capteur de pente de fil est intéressant dans la mesure où la variation de pente de fil permet de détecter le contour des nœuds et ainsi d'apporter une information locale qui permet de mieux prédire le module élastique mesuré en flexion 4 points. En effet, le coefficient de détermination de cette méthode est supérieur de 2% par rapport à la précédente. La détection de singularités par scanner à rayons X apporte le même gain.

L'association de la masse volumique obtenue par rayons X à travers la formule de Guitard [11] et la pente de fil grâce à l'équation de Hankinson est décrite dans [4], mais appliquée ici dans le cas du douglas. Cette méthode semble la moins efficace pour la prédiction du module élastique. Cela est certainement dû à une moindre corrélation du module élastique avec la densité ou bien encore à une mauvaise prise en compte de l'influence des nœuds sur le module. Le coefficient de détermination demeure égal à 0.82 lorsque les trois méthodes sont combinées.

Au niveau de la résistance à la rupture, l'analyse vibratoire donne seulement un coefficient de détermination de 0.41, bien inférieur aux autres méthodes. Cela traduit une mauvaise corrélation entre la résistance et le module dans le cas de bois avec défauts (puisque dans ce cas le module est directement utilisé comme indicateur de la résistance). Par contre, en l'associant à l'approche par densitométrie par rayons X et calcul du KDR, on obtient un meilleur résultat égal à 0.48. Il est encore amélioré en optant pour la mesure de la pente de fil au lieu des rayons X (0.58). La combinaison des trois techniques est la plus efficace avec un coefficient de détermination égal à 0.62, mais cette

dernière solution augmente de manière très significativement le coût de la machine de classement. La mesure de la pente de fil est donc la technique qui apporte le gain le plus significatif. Remarquons cependant que ces résultats dépendent des modèles utilisés et ces derniers pourraient être améliorés en prenant par exemple en compte la taille, le type et la direction des nœuds, ce qui serait susceptible. Il serait aussi intéressant de détecter les flaches, les fentes, le bois de réaction et de différencier le bois juvénile du bois adulte.

## Conclusion

Cette étude a permis démontrer la faisabilité du classement pour la résistance du bois et plus particulièrement celui du douglas en associant l'analyse vibratoire à la mesure de la pente de fil. Ces deux techniques utilisées ensemble semblent assurer de meilleurs résultats que celles utilisant un scanner à rayons X. En perspective, il convient de vérifier ce résultat sur d'autres essences, ainsi que d'améliorer la prédiction de la résistance à la rupture afin de mieux localiser la position de rupture en fonction des singularités de chaque planche.

## Remerciements :

*Cette étude est soutenue par le conseil général de Bourgogne et par l'Agence Nationale pour la Recherche (projet CLAMEB ANR-11-RMNP-0015). Les auteurs remercient particulièrement le LE2I pour le traitement d'image, le LERFoB pour l'échantillonnage, le LaBoMaP pour les essais non-destructifs, le LERMAB pour la partie modélisation, FCBA pour les essais destructifs, et enfin les partenaires industriels Arbonis, Ducerf, Monnet-Seve et Piveteau pour leur implication.*

## Références

- [1] EN 338 : Bois de structure - Classes de résistance (2009)
- [2] NF EN 14081 : Structures en bois - Bois de structure à section rectangulaire classé pour sa résistance - Partie 1 : exigences générales
- [3] AFNOR, EN B52 001-1, Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus - Partie 1 : bois massif (2011).
- [4] J. Viguier, A. Jehl, R. Collet, L. Bleron, Fabrice Meriaudeau, Improving strength grading of timber by grain angle measurement and mechanical modeling, Wood Material Science and Engineering (2014), 10, pp 145-156.
- [5] H. Baillères, G. Hopewell, G. Boughton, L. Brancheriau, Strength and stiffness assessment technologies for improving grading effectiveness of radiata pine wood, Bioresources (2012), pp 1264-1282
- [6] P. Guindos, M. Guaita, The analytical influence of all types of knots on bending, Wood Sci Technol (2014), 48, pp: 533-552.
- [7] A. Jehl, L. Bleron, F. Meriaudeau, R. Marchal, Apport de la mesure de pente de fil au classement mécanique des bois de structures, Congrès Français de Mécanique (2011)
- [8] J. Zhou, J. Shen, Ellipse detection and phase demodulation for wood grain orientation measurement based on the tracheid effect, Optics and lasers in engineering (2003), 39, pp 73-89
- [9] L. Brancheriau, Expertise mécanique des sciages par analyses des vibrations dans le domaine acoustique, Thèse, Université de la méditerranée- Aix Marseille II (2002)

[10] EN 408 : Bois de structure et bois lamellé-collé. Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques (2012)

[11] D. Guitard, Mécanique du Matériau Bois et Composites, Cepadues (1987)